

## Chapitre N° 1 : Notions de Semi-Conducteurs

### 1. Introduction :

Du point de vue **conduction électrique**, les matériaux peuvent être caractérisés par la **conductivité  $\sigma$**  (résistivité  $\rho$ ).

- **La conductivité  $\sigma$**  est une caractéristique physique qui nous donne ce pouvoir de laisser passer librement les charges électriques
- **La résistivité  $\rho$**  représente la capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique

Un **semi-conducteur** est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique  $\sigma$  d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des **métaux** et des **isolants** à proprement parler.

Isolants	Semi-Conducteurs	Conducteurs
$\sigma < 10^{-8} S.cm^{-1}$	$10^{-8} S.cm^{-1} < \sigma < 10^3 S.cm^{-1}$	$\sigma > 10^3 S.cm^{-1}$

Avec

$$\sigma = \frac{GL}{S}$$

Tel que : **R** : Résistance en  $\Omega$        **$\rho$**  : Résistivité en  $\Omega.m$        **$\sigma$**  : Conductivité en  $S.m^{-1}$   
**G** : Conductance en  $S$       **L** : Longueur en  $m$       **S** : Surface en  $m^2$

$$R = \frac{L}{\sigma S} \text{ (en fonction de la conductivité)} \quad \text{ou} \quad R = \frac{\rho L}{S} \text{ (en fonction de la résistivité)}$$

### 2. Semi-conducteurs, Conducteurs et Isolants :

#### 2.1 Structure atomique :

Tout matériau est constitué d'atomes. Ces atomes contribuent aux propriétés électriques d'un matériau, incluant son habileté à conduire le courant électrique. Afin de discuter de ses propriétés électriques, un atome peut être représenté par la couche de valence et un cœur constitué de toutes les couches intérieures et du noyau.

Atome de Carbone  $^{12}_6C$  :

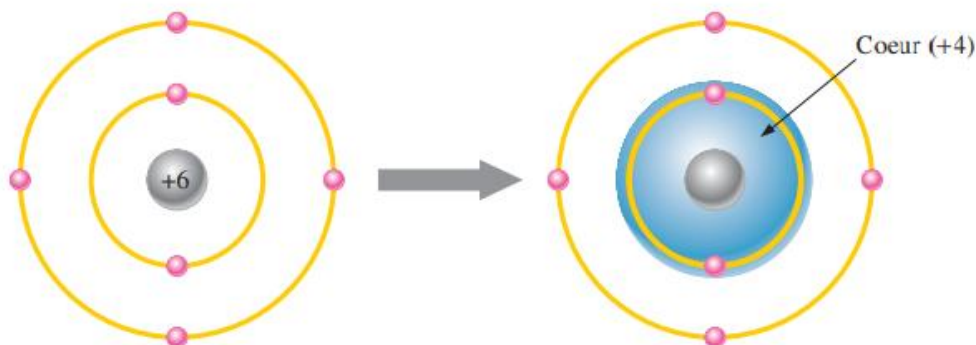


Figure 1 : Diagramme d'un atome de Carbone et de sa représentation sous la forme d'un cœur et de couche de valence

**Conducteur** : est un matériau qui conduit aisément le courant électrique tel que : le cuivre, l'or, l'aluminium, l'or et l'argent. Ces derniers sont caractérisés par des atomes ayant un seul électron de valence faiblement lié à l'atome. Ces électrons de valence peuvent facilement se détacher de leur atome et devenir des électrons libres. De ce fait, un conducteur possède beaucoup d'électrons libres qui peuvent engendrer le courant.

**Isolant** : est un matériau qui ne conduit pas le courant électrique sous des conditions normales. Généralement, les bons isolants sont des matériaux composés de plusieurs éléments, contrairement aux conducteurs. Les électrons de valence sont solidement rattachés aux atomes, laissant très peu d'électrons libres de se déplacer dans un isolant.

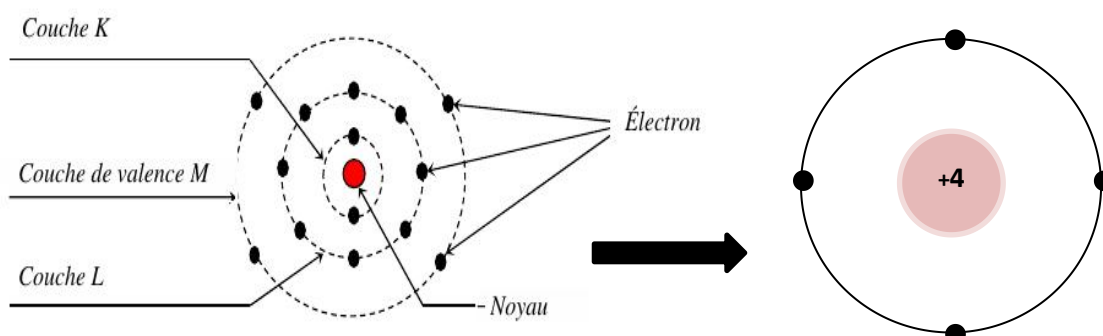
**Semi-conducteur** : est un matériau qui a des propriétés intermédiaires entre un conducteur et un isolant. Lorsqu'il est exposé à une source d'énergie, un semi-conducteur peut facilement transporter des charges électriques et créer un courant électrique. Il existe des semi-conducteurs à élément unique tel que le Silicium **Si**, le Germanium **Ger** et le Carbone **C** représentant des atomes **tétravalent** (classés dans le groupe IV-A).

[illegible]

Ainsi que des semi-conducteurs à éléments composés tels l'Arséniure de Gallium **GaAs**, le Phosphure d'Indium **InP**, etc. Un semi-conducteur à l'état pur (intrinsèque) n'est pas un bon conducteur ni un bon isolant.

Nous disons d'ailleurs que nous sommes à l'âge du **Silicium**, le plus utilisé des semi-conducteurs. Le **Silicium** (symbole **Si**, numéro atomique **14**) est l'élément le plus abondant, après l'oxygène, à la surface du globe. Sa configuration électronique est représentée comme suit :

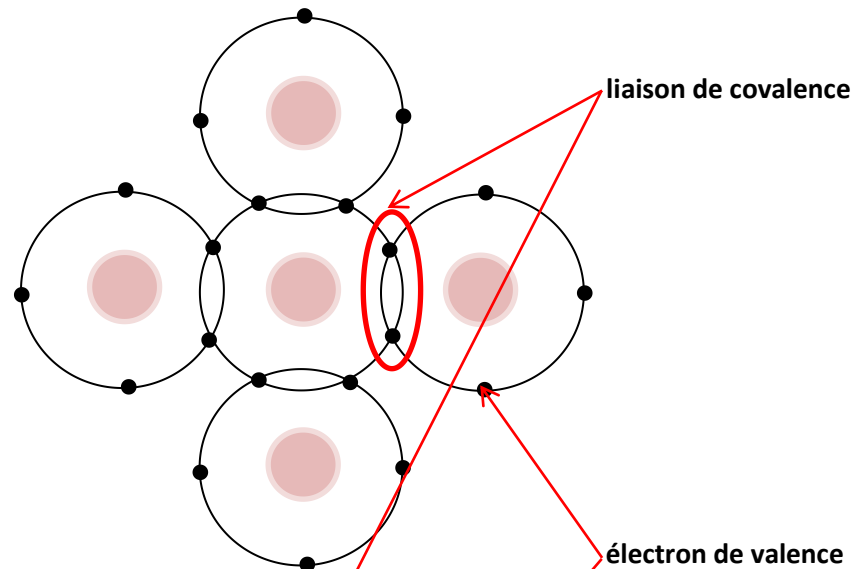
La couche K contient 2 électrons, la couche L 8 électrons et la couche M, appelée couche de valence dans ce cas, contient 4 électrons.



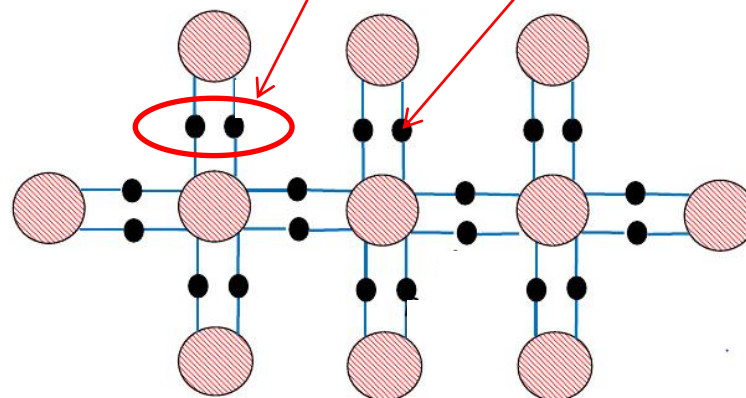
**Figure 2 : Configuration électronique de l'atome Silicium**

L'atome est électriquement neutre mais pour qu'il soit stable et puisse constituer un solide sa couche de valence devrait contenir 8 électrons (quatre qui lui sont propres et quatre qui proviennent de ses plus proches voisins).

**Figure 3 : Représentation simplifiée (couche de valence)**

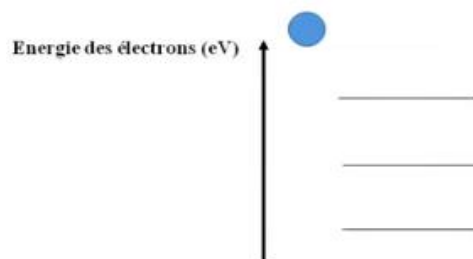


Et qui peut être représentée comme suit :



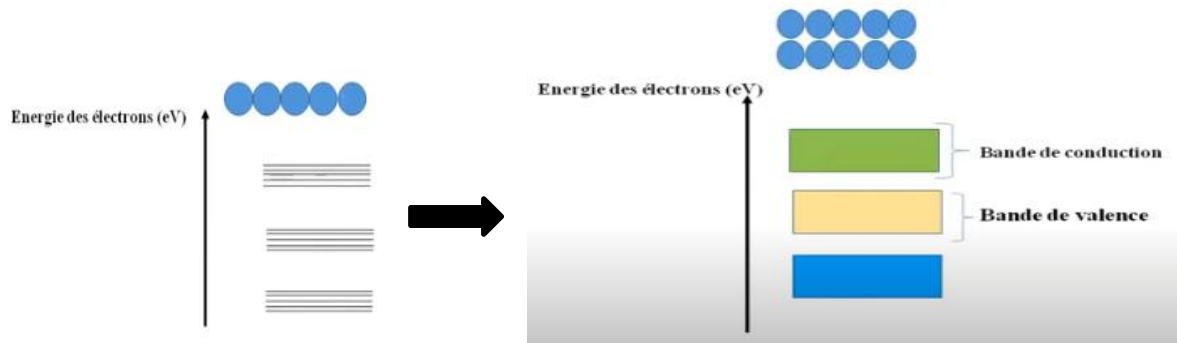
## 2.2 Bandes d'énergie :

Rappelons-nous que les électrons évoluent sur des orbites stables correspondant à des niveaux d'énergie discrets (séparés les uns des autres)



**Principe d'exclusion de Pauli :** deux électrons ne peuvent occuper le même état quantique.

Au fur et à mesure que notre métal solide se construit, les niveaux énergétiques se démultiplient créant des bandes d'énergie.



**Bande de valence** : bande dans laquelle sont confinés les **électrons de valence** (4 e- pour le cas du Silicium) qui ont besoin d'un apport extérieur d'énergie pour se dé-confiner.

**Bande de conduction** : bande supérieure en énergie à la bande de valence. Elle contient les **électrons libres** qui ont rompus leur liaison avec leur atome d'origine et qui permettent la conduction d'un courant. Notons que cette bande peut être **vide**, c'est à dire il n'y a pas des électrons libres qui l'occupent.

Selon la théorie des bandes d'énergie, nous pouvons distinguer les conducteurs, les semi-conducteurs et les isolants :

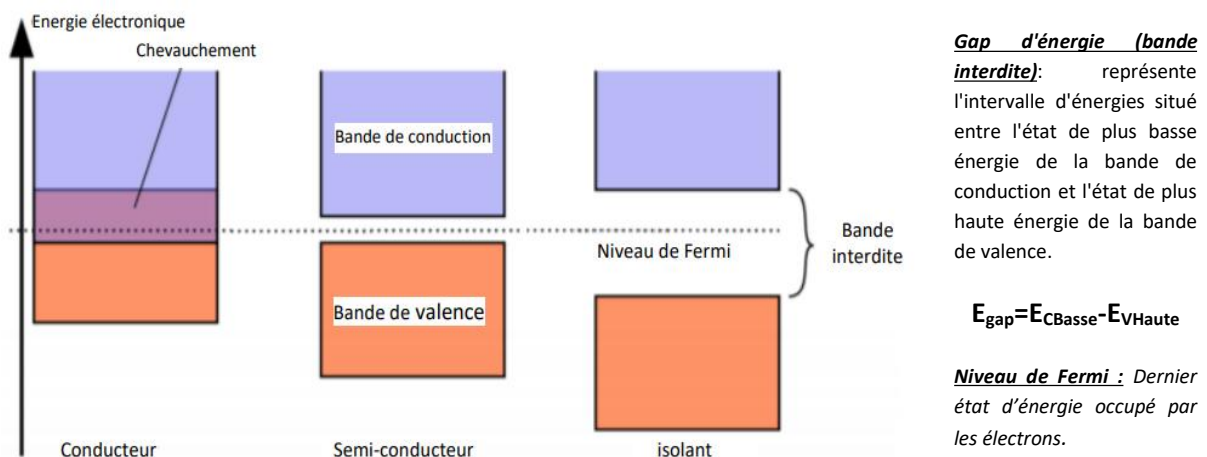


Figure 4 : Différence entre les matériaux à base des bandes d'énergie

A 0 Kelvin, tous les électrons se trouvent dans la bande de valence pour les isolants et les semi-conducteurs. La distance qui sépare la bande de valence et la bande de conduction est très importante pour les **isolants** environ 7eV. Cette valeur importante ne permet pas le passage des électrons à la bande de conduction. Quand la température augmente, une quantité très négligeable d'électrons peut passer à la bande de conduction, ce qui fait croître légèrement la conductivité, mais l'isolant reste non conducteur.

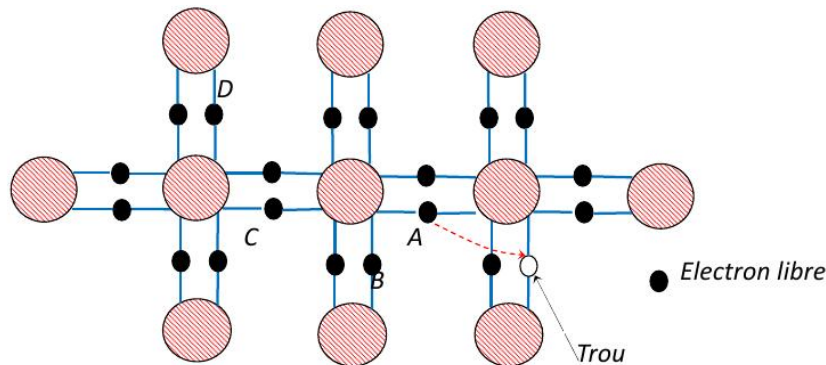
Cependant, les **semi-conducteurs** sont caractérisés par une bande interdite faible, de l'ordre de 1eV à 1.5eV. Un apport modéré de la température peut faire passer les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Plus la température augmente, plus le nombre des électrons libres augmente, le **semi-conducteur passe donc de l'isolant au conducteur**.

Dans le cas des **conducteurs**, la bande de valence et la bande de conduction sont très proches ou elles se chevauchent carrément. Ainsi, un électron quelque soit la température, peut passer à la bande de conduction, c'est-à-dire il devient libre.

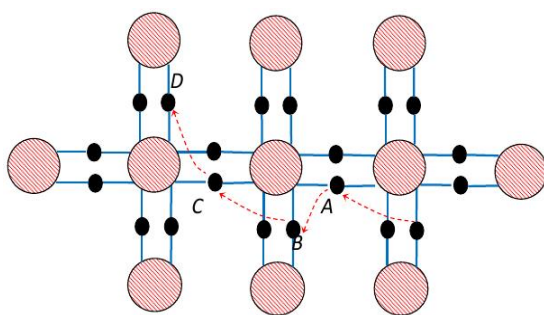


### 2.3 Courant de trous :

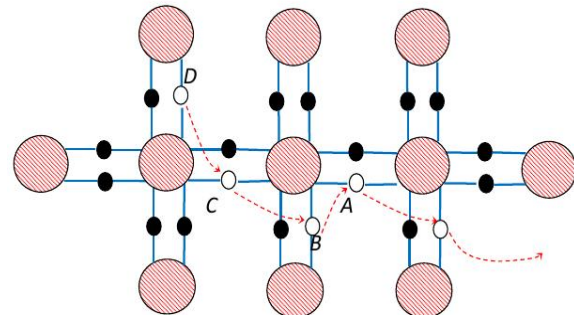
Quand l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction, il laisse un espace vide dans la bande de valence cet espace est appelé **trou**, car la bande de valence n'est plus saturée, il lui manque une charge négative.



Ce trou va attirer un électron de la bande de valence en et le capte. Le trou initial disparaît et apparaît un nouveau trou en A. Celui-ci va attirer à son tour un autre électron de la bande de valence en B. Le trou en A disparaît à son tour et un trou apparaît en B. L'opération se répète pour les points C et D.



Chemin de déplacement du trou



Chemin de déplacement de l'électron

Finalement les trous se déplacent suivant le chemin  $A \Rightarrow B \Rightarrow C \Rightarrow D$  et les électrons se déplacent suivant le même trajet mais dans le sens opposé  $D \Rightarrow C \Rightarrow B \Rightarrow A$ .

En fait, c'est l'électron qui se déplace réellement dans la bande de valence.

Par conséquent, dans un semi-conducteur il y a deux types de courants :

- Un courant dû aux électrons libres de la bande de conduction, qui est identique à celui des conducteurs.
- Un courant dû aux trous (aux électrons de valence) dans la bande de valence. Ce courant est spécifique aux semi-conducteurs.

#### Remarque :

L'orbite de la bande de conduction d'un atome coupe parfois l'orbite d'un trou d'un autre atome, il en résulte une fusion de l'électron et du trou : le trou disparaît et l'électron libre redevient électron de valence. Cette fusion est appelée **recombinaison**.

électron de la bande de conduction + trou de la bande de valence = électron de la bande de valence

### 3. Dopage :

Il y a différents types de semi-conducteurs:

– ceux qui sont dits « **intrinsèques** »: le matériau est dit « **pur** » c'est à dire sans défauts structuraux ni atomes étrangers. Notons que dans la réalité un semi-conducteur n'est jamais totalement intrinsèque. Ces matériaux conduisent très peu le courant.

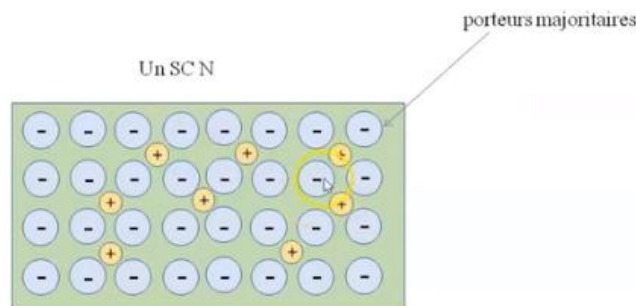
– ceux qui sont dits « **dopés** »: dans le matériau se trouve des impuretés qui vont donner des porteurs libres (électrons ou trous). On classe les matériaux dopés en 2 groupes : les **dopés N** (**e<sup>-</sup> en plus dans le matériau**) et les **dopés P** (**charges positives en plus dans le matériau**).

Le **dopage** d'un matériau consiste à **introduire volontairement des impuretés** dans un semi-conducteur ultra purifié. Pour cela, il est nécessaire que la concentration des atomes étrangers non éliminés soit nettement inférieure à celle des atomes introduits. Les atomes introduits viennent se placer en position de substitution dans le réseau.

### 3.1 Semi-conducteur dopé N :

Un semi-conducteur type N est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type **donneurs** (ex : **Arsenic (As), Antimoine (Sb) et Phosphore (P)**). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

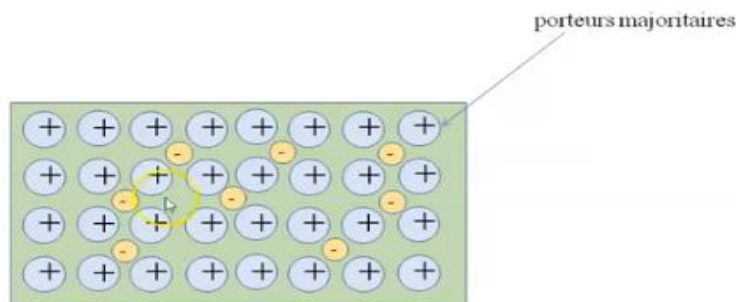
Dans ce cas les semi-conducteurs dopés N possèdent une quantité importante des **e- libres**. Ces derniers sont considérés des porteurs **majoritaires** et donc les **trous** seront des porteurs **minoritaires**.



### 3.2 Semi-conducteur dopé P :

Un semi-conducteur type P est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type **accepteurs** (ex : **Aluminium (Al), Bore (B), Gallium (Ga) et Indium (In)**). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur ou autrement parce qu'elles apportent une charge positive (le trou).

Dans ce cas les semi-conducteurs dopés P ont un manque d'électron qu'on peut les considérer comme des charges positives libres. Ces **trous** sont appelés porteurs **majoritaires** et donc les porteurs **minoritaires** sont les **électrons**.



Semi-conducteur dopé P	Semi-conducteur dopé N
Atomes trivalents : Accepteurs	Atomes pentavalents : Donneurs

<b>Porteurs majoritaires :</b> trous <b>Porteurs minoritaires :</b> électrons	<b>Porteurs majoritaires :</b> électrons <b>Porteurs minoritaires :</b> trous
--	--